

某型飞机实验室高温试验条件剪裁方法研究

张亚娟, 弓云昭, 王红斌

(中国飞机强度研究所, 西安 710065)

摘要: 针对整机级飞机实验室高温验证试验, 更真实地模拟飞机地面高温环境条件。通过对 GJA 150A、MIL-STD-810G 及 RTCA/DO-160G 等国内外最新气候试验标准进行分析, 确定某型飞机实验室高温试验程序。以此试验程序为基础, 根据飞机温度适应性要求, 借鉴民用飞机运行环境包线以及国外飞机实验室温度试验的经验, 经过分析与剪裁处理, 得到了某型飞机实验室高温试验条件。形成了飞机实验室高温试验条件剪裁方法, 研究成果可为整机级飞机实验室高温试验设计提供参考。

关键词: 高温试验; 试验程序; 剪裁方法; 试验条件

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.05.011

中图分类号: V216

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)05-0071-06

Tailoring Method of High Temperature Test Conditions of a Certain Type of Aircraft Laboratory

ZHANG Ya-juan, GONG Yun-zhao, WANG Hong-bin

(Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: The paper aims to more truly simulate the high-temperature environment conditions on the ground of aircraft through high-temperature verification laboratory test of the whole aircraft. By analyzing the latest climate test standards at home and abroad such as GJA150A, MIL-STD-810G and RTCA/DO-160G, the high temperature test program of a certain aircraft laboratory was determined. Based on this test procedure, combined with the requirements of aircraft temperature adaptability, the envelope of civil aircraft operating environment and the experience of foreign aircraft laboratory temperature tests, the high temperature test conditions of a certain type of aircraft laboratory were obtained by analysis and tailoring. The high temperature test condition tailoring method for the aircraft laboratory are formed, and the research results can provide a reference for the high temperature laboratory test design of the whole aircraft.

KEY WORDS: high temperature test; test procedure; tailoring method; test conditions

高温是飞机在地面停放、运输和工作期间经常遇到的自然环境, 高温及高温与其他环境因素的综合作用直接或间接地影响飞机的功能和性能。例如, 高温可能改变飞机材料的物理和电气特性, 从而导致设备故障; 不同材料的不一致膨胀导致零件相互咬死, 结构变形; 有机材料老化、变性以及开裂; 高温会使飞

机液压油的黏度降低, 从而导致液压系统的泄漏, 严重的会导致飞机工作过程中发生故障或失效; 高温还可能导致燃油系统气塞, 电子电气设备性能下降, 结构材料承载能力下降。总之高温会使飞机材料特性劣化, 部件或设备故障, 故障模式可能导致结构完整性破坏, 甚至灾难性损坏。实验室高温试验的目的主要

收稿日期: 2020-01-09; 修订日期: 2020-02-13

Received: 2020-01-09; Revised: 2020-02-13

作者简介: 张亚娟 (1972—) 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞机气候环境适应性试验技术。

Biography: ZHANG Ya-juan (1972—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: climate environment adaptability test technology of aircraft.

是考核高温对飞机结构及系统功能和性能的影响,评价飞机在高温条件下工作和贮存的适应性,发现飞机与高温气候环境相关的飞行安全缺陷,可为飞机的设计优化与工艺改进提供支持,从而有效降低飞机试飞风险,提高试飞效率,缩短试飞周期。

RTCA/DO-160 是由美国航空无线电委员会(RTCA)第135分会(机载设备环境条件与试验方法分会)制订的。该标准已经历了8次修订,2010年颁布了最新版的RTCA/DO-160G《机载设备环境条件和试验方法》,修正并优化了RTCA/DO-160F版本中的一些试验要求和试验条件。MIL-STD-810和GJB150系列是军用装备环境试验标准,GJB150A—2009对应的是MIL-STD-810F版本。MIL-STD-810系列标准从1993年到2008年期间,经历了810A到810G多次修订。从810D版开始,提出了“剪裁”的概念,到810F已特别强调标准在全寿命期环境工程应用中的重要性,对试验剪裁的要求也越来越高。总之民用和军用的最新环境试验标准都是剪裁标准,这些试验标准的试验程序多,适用性广,试验条件都没有直接给出具体的环境数据,强调全面推行试验剪裁技术。

1 试验程序剪裁

1.1 军用装备高温试验标准

GJB150.3A—2009与MIL-STD-810F中501.4的高温试验方法基本相同,都提倡根据装备环境剖面、任务剖面等信息对标准进行剪裁。GJB150.3A—2009《高温试验》规定了两大类试验程序:程序I——贮存,程序II——工作^[1]。MIL-STD-810G中的高温试验包含三个程序:程序I——贮存,程序II——工作,程序III——应急时备用工作^[2]。

1) 贮存。用来研究贮存期间的高温是如何影响设备的完整性、安全性以及工作性能的。该试验程序包括将试件暴露在设备储存时可能遭遇的高温环境中(以及低湿度,可应用时),之后在室温环境条件下进行工作性能检测,包含恒温贮存和循环贮存两种考核方式。

2) 工作。用于调查设备工作时高温是如何影响其工作性能的,包含恒温工作和循环工作两种考核方式。

3) 应急时备用工作。主要适用于考核如通信保护棚暴露在阳光下之后可能要求立即工作的设备,仅进行“恒温工作”试验。

1.2 民用机载设备高温试验标准

DO-160G中高温试验属于“温度-高度”试验内容,没有单独的低温、高温试验章节。“温度-高度”试验将与高温试验有关的试验程序细分为:地面高温耐受试验、高温工作试验和高温短时工作试验^[3],其

试验程序示意图见图1。

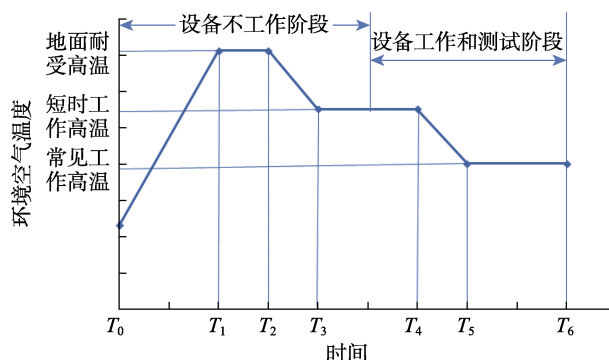


图1 民用机载设备高温试验程序

Fig.1 High temperature test procedure of civil airborne equipment

地面高温耐受试验实际上是贮存试验,主要是模拟飞机在机场地面存放期间遇到的极端气温对机载设备的影响。其主要特点为试验温度严酷,试验持续时间较长。

高温工作试验模拟飞机飞行中机载设备工作时可能遇到的最高温度环境对其产生的影响。飞机在高空低速飞行时,其未控温区靠近蒙皮,且周围无热源的设备通常处于最低温度环境中。在机上特殊位置安装的设备,如仪表板后面的封闭空间、设备底部和发动机舱的设备则由于周围热源的影响及通风不良,通常处于最高温度环境中。其主要特点为:试验温度一般不如耐受温度严酷;试验持续时间相对较短;试验期间要求受试设备工作并满足性能标准要求。

高温短时工作试验模拟在机场极端高温下停放的飞机突然起飞,机上某些机载设备要立即投入工作时遇到的短时存在的高温环境,这种高温会由于机上空调系统开始工作而降低。因此这一试验仅考核机载设备在此高温的短时工作能力。其主要特点为:试验温度通常等于或低于耐受温度;试验时间短;试验期间要求受试设备工作并符合性能标准要求。

1.3 飞机地面高温环境分析

1.3.1 高温地面停放试验

飞机地面停放的环境适应性要求主要与自然环境影响有关,尤其取决于飞机的部署区域,但与飞机的任务特性关系不大。由于飞机停放阶段各机载设备不产生热量,使设备舱和结构温度升高的热源主要是外部大气温度和辐射诱发的热效应。飞机停放时耐受的高温环境更趋向于太阳辐照环境。因此,可以选择高温日循环贮存试验程序。以1天为周期的典型高温循环(包含太阳辐射)试验流程如图2所示。

1.3.2 高温地面工作试验

高温地面工作试验主要用于评估高温对设备工

作期间性能的影响，可以分为循环工作和恒温工作。循环工作试验温度以模拟太阳辐照日循环变化，该试验适用于持续或较长时间在野外固定工作的设备。飞机及其机载设备不属于这类野外固定工作设施，因此推荐飞机高温地面工作试验可选恒温工作试验程序。根据现代飞机需要全球部署运营的环境适应性要求，建议恒温温度可分为常见高温和极端高温两种，也可根据具体型号进行再剪裁。

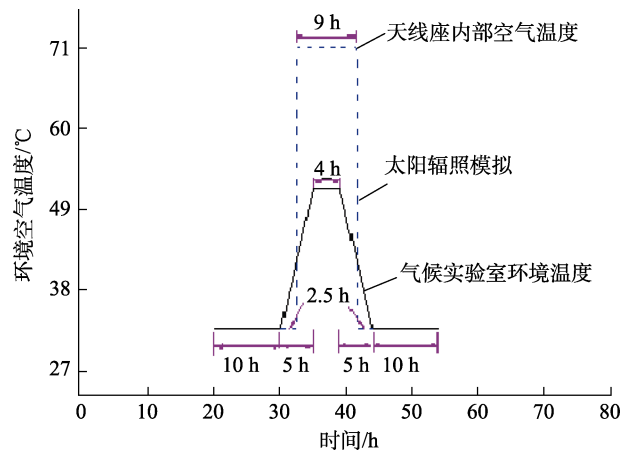


图 2 典型的高温试验流程
Fig.2 Typical high temperature test flow

1.4 高温试验程序剪裁结果

根据以上军用装备及民机机载高温试验方法的分析，以及飞机使用特性和温度适应性设计要求的分析，并借鉴麦金利气候实验室飞机高温试验经验，剪裁得到整机级飞机高温试验程序。将该试验程序跟军用装备和民用机载设备的高温试验程序进行对比，三者试验程序的比较见表 1。表 1 中整机级飞机高温试验程序适用于实验室飞机高温试验，模拟飞机地面停放和地面短时启动工作的使用状态。

表 1 三类高温试验程序比较
Tab.1 Comparison of three types of high temperature test procedures

试验对象	贮存或停放		工作	
军用装备 (MIL-STD-810G)	高温	高温	高温	高温
	恒温	循环	恒温	循环
民用机载 (RTCA/DO-160G)	地面	高温	高温工作	
	耐受高温	短时工作		
整机级飞机	高温循环	常见 高温恒温	极端高温恒温	

2 飞机实验室高温试验条件剪裁的考虑因素

2.1 飞机温度适应性要求

飞机环境技术要求是指对飞机及其机载设备的

一系列环境适应性及其验证要求，也包括对确定这些要求的依据或过程的一些说明。飞机温度适应性要求是其环境技术要求文件的重要组成部分。

飞机温度环境适应性要求主要包括对高/低温停放、高/低温工作、温度冲击、高度（低气压）、以及湿热等综合环境的适应性要求。飞机气候实验室高温试验主要是模拟飞机地面停放及地面短时工作状态，其试验条件的选择与以下两方面的飞机温度适应性要求有关。

2.1.1 地面停放高温极值

飞机在地面停放时不产生热量，飞机结构和机载设备的温度主要受外部大气温度和太阳辐射的影响。不管是什么类型的飞机，只要部署区域相同，遇到的极端温度都是相同的。根据 GJB 1172.2—91 军事装备气候极值提供的数据，我国地面高温记录极值为 47.7 °C^[4]（1986 年 7 月 23 日出现在新疆吐鲁番），全球地面高温记录极值为 56 °C^[5]。

飞机温度环境技术要求一般并不是采用记录极值，而是综合考虑时间风险率和温度极值。例如，考虑地面高温工作温度时，采用时间风险率高温极值。我国地面高温工作极值分别为 45.5、42.9、41.1、40.0 °C 时，对应的时间风险率为 1%、5%、10%、20%^[4]。然而，全球地面高温工作极值分别为 49、46、45 °C 时，对应的时间风险率为 1%、5%、10%^[5]。这意味着停放在外场的飞机在最热的月份里，仍有 1% 的风险暴露在 49 °C 温度下。

2.1.2 地面停放诱发高温极值

在飞机极端高温出现时，有必要考虑太阳辐射环境的影响。美国相关资料报道，停在外场的飞机，其内部温度比空气温度高 15~30 °C^[6]。20 世纪 70 年代，中国飞机温度测量数据也表明，在阳光直射下，飞机内部设备舱的温度比大气温度高 15~20 °C。GJB 1060.2—91 中的 5.4.3.2 条款规定：“露天部位应符合 5.2.3 规定的预计设备暴露于现场的时间相对应的高温极值再加上 1110 W/m² 太阳辐射产生的温升（相当于 17 °C）”，这也是基于测量结果的工程处理。虽然飞机不同部件的热特性不同，但经过足够长的时间后，飞机各部件的最高温度都会达到 70 °C 左右。因此推荐飞机高温日循环贮存最高温度为 70 °C^[7-8]。

2.2 民用飞机运行环境包线

B737 飞机的工作环境包线如图 3 所示^[9]。由图 3 可见，飞机工作环境的最低温度为 -73 °C，起飞和着陆的最低温度限制为 -54 °C，最高工作温度限制为 +54 °C。一般来说，大型客机的运行环境包线与该飞机相似。飞机地面运行环境包线右边界为 54 °C，同

时参考世界地面极端温度值,建议飞机工作极端高温可选 55℃。

2.3 典型机型实验室温度试验条件

麦金利气候实验室可为美国空军和大型飞机制造商提供全球地面气候环境试验条件,在该实验室进行了 400 多种飞机型号和 2600 多种军事设备的气候试验。最早期的飞机试验型号包括 C5、F117、F22、F35、B787、CS100、A350XWB 等,这几种飞机型号的实验室温度气候试验条件如图 4 所示^[9]。由图 4 可知,麦金利气候实验室进行的飞机整机级高温试验的最高温度基本没有超过+55℃,主要分布在 40~55℃。

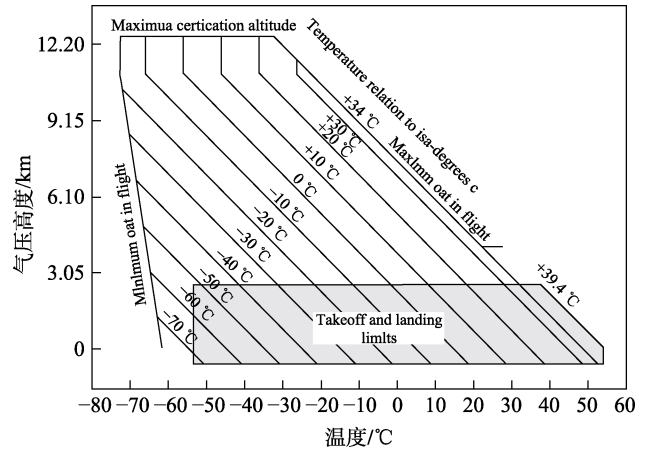


图 3 B737 飞机运行环境包线
Fig.3 B737 aircraft operation environment envelope

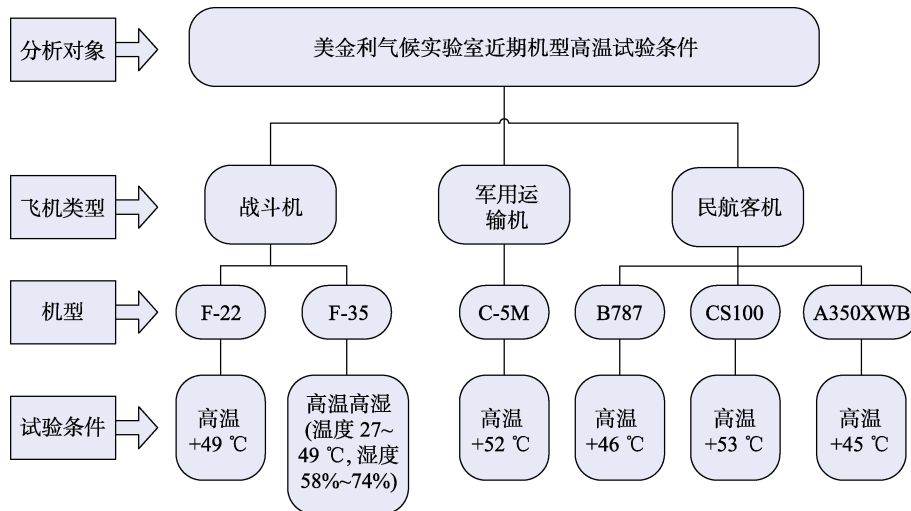


图 4 麦金利气候实验室几种机型高温试验条件信息
Fig.4 High temperature test conditions of several models in McKinley climate laboratory

3 飞机实验室高温试验条件剪裁方法

整机级飞机实验室高温气候试验程序一般包括地面贮存停放和地面工作两个程序。每一程序包含恒温 and 循环温度两种试验条件。高温试验条件主要包括温度、试验时间、温度变化率和相对湿度。飞机服役的气候环境变化多端,区域性的气象数据不能代表其全寿命期的环境剖面,也难以捕捉到全寿命期的气候环境极值数据。因此,一般很难进行气候环境数据采集工作。通常采用世界或我国气候环境极值标准中收集的气候环境极值数据,并相应地确定试验条件。

3.1 高温循环贮存

飞机通常贮存在机库或停机坪内,避免在周围安装连续加热设备,因此飞机的高温贮存停放环境往往更趋于日常循环环境。同时由于民用飞机要求全球运营,建议选择 GJB 150.3A 中的“气候型——热”诱导条件温度作为试验温度。日循环温度见表 2^[1]。

表 2 高温循环贮存试验温度-时间

Tab.2 Temperature-time of high temperature cyclic storage test

时刻	诱发温度/℃	时刻	诱发温度/℃	时刻	诱发温度/℃
01 : 00	35	09 : 00	44	17 : 00	67
02 : 00	34	10 : 00	51	18 : 00	63
03 : 00	34	11 : 00	56	19 : 00	55
04 : 00	33	12 : 00	63	20 : 00	48
05 : 00	33	13 : 00	69	21 : 00	41
06 : 00	33	14 : 00	70	22 : 00	39
07 : 00	36	15 : 00	71	23 : 00	37
08 : 00	40	16 : 00	70	24 : 00	35

GJB 150.3A 指定的循环存储试验时间至少为 7 天,主要用于模拟世界范围内最严酷地区、最严酷月份内极端温度出现频率为 1%的小时数。飞机高温贮存试验循环周期也推荐选为 7 个日循环^[1]。

3.2 高温恒温工作

飞机的工作状态一般有:地面通电自检、发动

机地面开车启动、飞机地面滑行（包括滑行加速起飞和着陆滑行减速）和空中飞行。除空中飞行外，其他几种动作持续工作时间较短，不会出现长时间连续工作的情况，用模拟高温日循环工作时间程序显然不合适。飞机空中飞行试验持续时间相对较长，高温状态也较复杂，这个阶段的试验一般通过飞机在极端气候环境中的试飞试验来完成。因此，飞机实验室的高温工作试验推荐采用恒温工作试验程序。

3.2.1 试验温度

根据飞机全球部署的运营要求，由表 2 可知，飞机在停机坪工作时承受的最高环境诱发温度为 71℃；最低环境诱发温度为 33℃。再根据表 2 数据的统计分析，以及大约 15℃为递增考核点，推荐飞机高温工作试验温度值分别为：40、55、70℃，其中 40℃是民机运行常见的高温天气，55℃为飞机地面运行环境包线右边界，70℃是飞机运行极端高温诱发环境温度，一般可不作为飞机高温工作考核试验温度，高温试验基线温度为 23℃。

3.2.2 试验持续时间

试验持续时间主要包括试件热浸时间和试验检测时间，热浸时间包括试件温度稳定时间和保温时间。GJB 150.3A 恒温工作试验程序规定：试件应暴露在恒温下，达到稳定温度后，试件应保温至少 2 h，然后试件开始工作，使温度重新稳定，即“二次温度稳定”后进行工作性能检测^[1]。对于飞机这种结构复杂、工作系统众多的庞大装备，“温度稳定”的时间

较难确定，建议依据在飞机机体、系统等关键部位分布的温度传感器的实时检测值来确定。如果所有检测值都达到要求温度，可以确定此时温度已稳定，再保持至少 2 h，这段时间即为飞机的热浸时间。试验检测时间跟实际的检测项目及操作难易程度等因素有关。

3.2.3 温度变化率

由于高温贮存和工作试验主要考核温度连续作用对设备的性能影响，温度变化率不应太大。如果变化率太大，相当于又对设备施加了温度冲击试验，属于“过试验”操作。为避免这种情况，通常规定温度变化率不超过 3℃/min。

3.3 飞机实验室高温试验条件剪裁方法

飞机实验室高温试验条件剪裁方法如图 5 所示。可以看出，高温试验条件剪裁以相关实验室高温试验标准或规范中规定的试验方法为基础。高温试验条件剪裁要考虑飞机温度适应性要求、飞机运行环境包线、典型机型温度试验经验等诸多因素。高温试验温度应力量值主要通过气候环境温度极值统计分析来确定，而温度应力作用时间要依据环境试验标准的相应要求及飞机结构特性确定。

3.4 某型飞机实验室高温试验条件剪裁示例

基于某型号飞机，以其地面贮存以及地面工作等环境条件为依据，应用以上剪裁方法，推荐该型飞机气候实验室高温试验程序及试验条件见表 3。

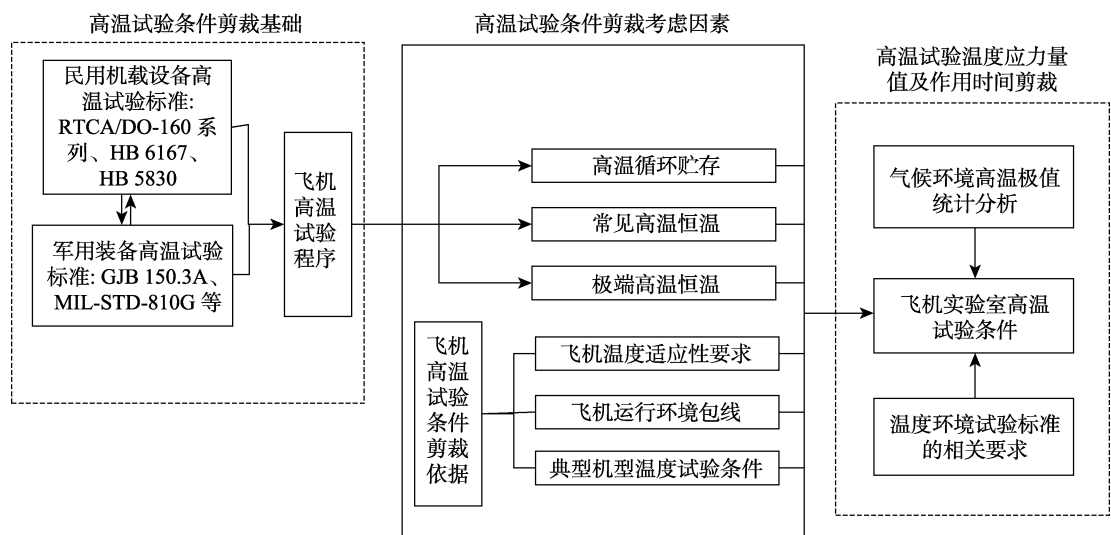


图 5 飞机实验室高温试验条件剪裁方法
Fig.5 Tailoring method of high temperature test conditions in aircraft laboratory

4 结语

文中通过对国内外最新最具权威的一些高温试

验标准的研究，确定了某型飞机实验室高温试验程序。以该试验程序为基础，依据飞机温度适应性要求、飞机自身特性（运行环境包线）及相关气候环境试验标准，同时结合国外飞机实验室温度气候环境试验条

表3 某型飞机气候实验室高温试验条件
Tab.3 High temperature test conditions of a certain aircraft climate laboratory

试验程序	试验温度	试验时间
高温日循环贮存试验	“气候类型——热”诱导温度, 具体见表2	7个循环, 每个循环周期为24 h, 热浸时间168 h, 检测时间可根据检测项目适时调整
常见高温恒温工作试验	40℃	温度稳定时间可依据飞机关键设备及部位实测温度达到40℃确定, 或相关技术文件规定的时间。试验的热浸透时间为温度稳定时间再加至少2 h, 检测时间可根据检测项目适时调整
极端高温恒温工作试验	55℃	温度稳定时间依据飞机关键设备及部位实测温度达到55℃确定, 或相关技术文件规定的时间。试验的热浸透时间为温度稳定时间再加至少2 h, 检测时间可根据检测项目适时调整

件案例, 剪裁得到了某型飞机高温试验条件。该研究为某型飞机实验室高温环境试验的实施提供了参考, 为形成整机级飞机实验室气候环境试验方法提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] GJB 150.3A—2009, 军用装备实验室环境试验方法 第三部分:高温试验[S].
GJB 150.3A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel—Part 3: High Temperature Test[S].
- [2] MIL-STD-810G, Environment Engineering Consideration and Laboratory test[S].DoD,USA,2008-10.
- [3] DO-160G, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment[S].
- [4] GJB 1172.2—91, 军用设备气候极值 地面气温[S].
GJB 1172.2—91, Climatic Extremes for Military Equipment Surface Air Temperature[S].
- [5] MIL-HDBK-310, Global Climatic Data for Developing Military Products[S].
- [6] 李尧. 飞机温度环境适应性要求分析和确定技术探讨[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 60-64.
LI Yao. Analysis and Confirmation Techniques for Requirements of Temperature Environmental Worthiness of Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6): 60-64.
- [7] 邹小玲. 直升机机载设备环境试验剪裁探讨[J]. 直升机技术, 2013(4): 24-28.
ZOU Xiao-ling. Tailoring of Environmental Test Standard for Airborne Equipment of Helicopter[J]. Helicopter Technique, 2013(4): 24-28.
- [8] 吴相甫. 航空装备实验室温度环境试验剪裁探讨[J]. 装备环境工程, 2018, 15(1): 74-79.
WU Xiang-fu. Tailoring of Laboratory Temperature Environment Test for Aviation Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(1): 74-79.
- [9] 王涛, 米毅. 大型客机气候实验室试验研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2017(4): 117-120.
WANG Tao, MI Yi. Research on Airliner Climatic Laboratory Test[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2017(4): 118-120.
- [10] MIL-STD-810F, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests[S].
- [11] RTCA/DO-160F, 机载设备环境条件和试验程序[S].
RTCA/DO-160F, Environmental Conditions and Test Procedures of Airborne Equipment[S].